DISEÑO DETALLADO DE UN AISLADOR ELASTOMÉRICO CON NÚCLEO DE PLOMO

Aguiar Roberto, Castillo Juan Gregorio y Pazmiño María Belén

Centro de Investigaciones Científicas
Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
Av. Gral. Rumiñahui, s/n, Valle de los Chillos
Quito, Ecuador

RESUMEN

Se presenta el marco teórico para diseñar completamente un aislador elastomérico con núcleo de plomo. Diseño que comprende la determinación del diámetro exterior e interior para dos sismos cuyos períodos de retorno son 475 y 2475 años; la determinación del espesor de las gomas en base a la deformación angular; la comprobación del espesor de las placas interiores; el diseño de las placas exteriores teniendo en cuenta la carga axial que llega al aislador y finalmente se realiza el control de la carga crítica de pandeo considerando desplazamiento horizontal, todo esto siguiendo la escuela de cálculo desarrollada en la Universidad de Buffalo.

Los espectros utilizados son los obtenidos en el estudio de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Quito. En el análisis se consideran dos límites para definir las propiedades mecánicas de los materiales, un inferior denominado LB (Lower Bound) y un superior llamado UB (Upper Bound).

Como aplicación se presenta el diseño de los aisladores en un edificio de tres pisos considerando dos alternativas. En la primera la altura total del aislador es mayor que el diámetro exterior y en la segunda que es la más conveniente la altura total es menor que el diámetro.

Palabras Claves: Aislador Elastomérico; Espectro de diseño; Carga de Pandeo en aislador.

ABSTRACT

The paper presents the procedure for the complete design of a lead rubber bearing. The design includes the determination of the outer and inner diameter for two types of earthquakes whose return periods are 475 and 2475 years; the determination of the rubber thickness based on the angular deformation; the verification of the thickness of inner plates; the design of outer plates considering axial load which acts in the isolator and finally it performs the control of critical buckling load considering horizontal displacement, all this procedure follows the calculus school developed in Buffalo University.

Recibido: Julio de 2013
Aceptado: Octubre de 2013

The spectra used, are the ones obtained in the microzoning study for Quito city. In the analysis it considers two limits to define mechanical properties of materials, a lower named LB (Lower Bound) and an upper named UB (Upper Bound).

As an application it presents the design of the isolators for a three story building considering two alternatives. In the first one the total height of the isolator is higher than the outer diameter and the second one which is the most convenient the total height is lower than the diameter.

Keyword: Elastomeric Isolator; design spectrum; Isolator's buckling load.

1 INTRODUCCIÓN

En el 2010 finalizó la construcción del puente de mayor longitud, construido en el Ecuador con aisladores sísmicos y es el que une San Vicente con Bahía de Caráquez. Estructuralmente se puede decir que este puente tiene tres tramos, el acceso en San Vicente de 153.95 m., sin aislación; el tramo central de 1710.67 m., con aisladores FPS (Frictional Pendulum System) y el tramo de acceso en Bahía de Caráquez de 120.30 m., sin aislación.

En el tramo central las pilas del puente están formadas por cuatro columnas de sección variable sobre las que se encuentran cuatro vigas, como se aprecia en la parte superior de la figura 1 y sobre estas van 2 aisladores FPS en cada eje, de tal manera que cada pila tiene 4 aisladores. Las columnas se apoyan en una malla y estos a su vez en pilotes de acero con unos tapones de hormigón. Romo (2013).



Figura 1 Puente San Vicente-Bahía de Caráquez con aisladores FPS.

Existen 38 tramos espaciados cada 45 m., como se observa en la parte inferior de la figura 1, los aisladores tienen un diámetro de 1.20 m. Tanto las vigas longitudinales como las transversales son de hormigón armado al igual que el tablero del puente.

En el 2010 también finalizó la construcción de 3 puentes con aisladores FPS, en el estuario del río Esmeraldas, estos son: el Puente Sur que tiene una longitud de 160 m.; el Puente Norte que mide 120 m., y el Puente Norte 1 que tiene una longitud de 108 m. Existe un cuarto puente sobre este río y es el de mayor longitud, 434 m., pero sin aisladores. A continuación se describe el Puente Norte 1. Aguiar (2010).



Figura 2 Descripción del Puente Norte 1 con aisladores FPS. Aguiar (2010)

En la parte superior izquierda de la figura 2, se muestran los aisladores FPS, antes de ser colocados con sus respectivos pernos de anclaje. Las dimensiones aproximadas del FPS son de 1.0 m., por 1.0 m. y 0.30 m., de alto. En la parte superior e inferior se encuentran dos placas de acero que sirven para transmitir la carga vertical, en cada placa existen cuatro aberturas por donde pasan los pernos de anclaje que tienen una longitud de 0.40 m.; cada aislador pesa 1.5 T. Estos aisladores se colocaron en todos los puentes de Esmeraldas y son similares a los que se utilizaron en el puente de Bahía de Caráquez.

En la parte superior derecha de la figura 2, se aprecia el apoyo central del puente, lo que aparece en la foto es la pila circular hueca que tiene un diámetro exterior de 6.0 m., y un diámetro interior de 4.80 m.; sobre ésta pila se encuentra

la viga superior, cuyas dimensiones en planta son 3.0 m., por 16.60 m., y tiene una altura de 1 m. Sobre esta viga se colocaron 3 aisladores FPS en la posición que se indica en la fotografía.

Ahora, en la parte inferior izquierda de la figura 2, se observa un aislador FPS colocado sobre uno de los estribos, que dicho sea de paso son estribos tipo cajón. En la fotografía se ven 2 de los 8 pernos de anclaje, en la parte superior hay 2 más y en la parte inferior existen 4 pernos sobre la viga de apoyo del FPS, las camisas de los pernos de anclaje que están bajo el FPS fueron colocadas antes de fundir la viga de apoyo que tiene 2.10 de base y 1.20 m., de alto. En la fotografía aparece también la viga transversal de acero y parte de 2 de las 6 vigas longitudinales de acero. Aguiar (2010)

Continuando con la descripción gráfica del PN1, en la parte central derecha de la figura 1.20 se presenta el apoyo central, ya descrito anteriormente pero ahora se ve el cabezal circular de 16.0 m., de diámetro que está soportada por 12 pilotes de 1.22 m., de diámetro colocados en forma radial. La altura del cabezal es de 1.50 m.; se ve también las 6 vigas de acero longitudinales que atraviesan los dos vanos del puente. Por cierto el puente tiene dos estribos exteriores y una apoyo central, son dos luces de 54 m., cada una. Por lo tanto, la longitud del puente es de 108 m., y esta es la longitud de las vigas continuas de acero que tiene una sección transversal tipo I cuyas dimensiones del ala y del alma son variables de acuerdo al sitio en que se encuentran dentro del puente, la altura de estas vigas es de 2.47 m.

En el 2011 finalizó la construcción de un puente en la Provincia de Guayas, de mayor longitud que el puente de San Vicente – Bahía de Caráquez con aisladores sísmicos y en el 2013 entró en funcionamiento el nuevo aeropuerto de Quito, en cuya losa de acceso se colocaron sobre las columnas aisladores.

Si bien es cierto, estructuras muy importantes se han construido en el Ecuador con aisladores sísmicos pero todavía no hay: edificios, hospitales, viviendas de interés social de 3 o pisos que tengan aisladores sísmicos; tal vez esto se deba a que se desconoce cómo se diseña por este motivo se escribió este artículo para socializar el diseño de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo de acuerdo a las últimas investigaciones desarrolladas en la Universidad de Buffalo. Constantinou *et al.* (2011); Constantinou (2013); Morales (2013).

El marco teórico se va a dividir en cuatro partes. Primero se indicará como se obtiene las dimensiones del aislador en forma macro, a partir del análisis sísmico del sistema de aislación; segundo se realiza el análisis sísmico espacial por el método de superposición modal, empleando un espectro reducido por R para la zona de períodos de la superestructura y por B para la zona de períodos del sistema de aislación; tercero, con las fuerzas encontradas en cada uno de los pórticos, en el paso anterior se encuentran los desplazamientos, giros y carga axial en cada aislador, se modela al aislador el como un elemento corto; y finalmente se presenta el diseño propiamente dicho del aislador.

2 ANÁLISIS SÍSMICO EN SISTEMA DE AISLACIÓN Y DIMENSIONES

Antes de diseñar se recomienda que el Proyectista Estructural encuentre la carga axial que gravita en un aislador y con ese valor ingrese a la tabla 1, para que tenga una idea del diámetro exterior del aislador, D_0 y del desplazamiento horizontal máximo que va a tener.

Tabla 1 Propiedades, desplazamiento y carga axial en función del diámetro del aislador

D_0 (mm)	**Propiedades del aislador**			**Desplazamiento Máximo** q_{max} (mm)	**Carga Axial** P_{max} (kg)
	k_d (T/m)	Q_d (kg)	K_v (T/m)		
305	20 – 40	0 – 6500	➢ 5000	150	45000
355	20 – 40	0 – 6500	➢ 10000	150	70000
405	30 – 50	0 – 11000	➢ 10000	200	90000
455	30 – 70	0 – 11000	➢ 10000	250	115000
520	40 – 70	0 – 18000	➢ 20000	300	135000
570	50 -90	0 – 18000	➢ 50000	360	180000

Tabla 2 Dimensiones del aislador y las placas de montaje

TAMAÑO DEL AISLADOR				**DIMENSIONES DE PLACAS DE MONTAJE**					
D_0 (mm)	H (mm)	# capas de goma	D_i (mm)	L (mm)	t (mm)	# orificios	Orificio ø (mm)	A (mm)	B (mm)
305	125-280	4-14	0-100	355	25	4	27	50	-
355	150-305	5-16	0-100	405	25	4	27	50	-
405	175-330	6-20	0-125	455	25	4	27	50	-
455	175-355	6-20	0-125	510	25	4	27	50	-
520	205-380	8-24	0-180	570	25	8	27	50	50
570	205-380	8-24	0-180	620	25	8	27	50	50

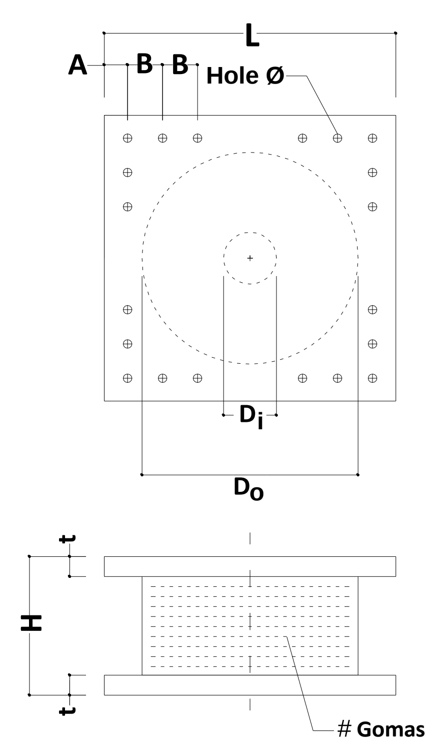


Figura 3 Nomenclatura de un aislador elastomérico.

Posteriormente con el valor de D_0 ingresa a la tabla 2 y encuentra: la altura total del aislador H; el diámetro interior del aislador D_i; la longitud de la placa exterior que se considera cuadrada L; el espesor de esta placa t, la disposición y diámetro de los orificios para colocar los pernos de anclaje, ver figura 3. Cueto (2013).

Con estas dimensiones preliminares se siguen los siguientes pasos para determinar los puntos que definen el modelo constitutivo del aislador; el período de vibración y el factor de amortiguamiento de un aislador. Christopoulos y Filiatrault (2006). Constantinou *et al.* (2011).

1.- **Propiedades Geométricas:** Se determina las dimensiones del aislador que son: D_0 diámetro exterior; D_i, diámetro interior; para el caso de un aislador circular; t_r altura de una capa de goma; t_s espesor de la placa shim de acero; T_r altura total solo de gomas (suma de los espesores de las gomas); espesor de las placas exteriores inferior y superior t_{bp}, t_{tp}; espesor de las placas exteriores que van dentro del aislador (si es que se requiere) t_{ip}; recubrimiento de la goma C_s. Todas estas dimensiones se presentan en la figura 4.

$$D_{O\,\approx}(3\ a\ 6)\ D_i \tag{1}$$

$$T_r\ \geq\ D_i$$

2. **Propiedades de los materiales:** Se debe determinar el módulo de corte de la goma G; El módulo volumétrico de la goma k; el módulo de corte del plomo G_p; el esfuerzo de corte del plomo τ_{py}. Se deben tener dos valores para cada propiedad correspondientes al nivel inferior LB (Lower Bound) y nivel superior, UB (Upper Bound).

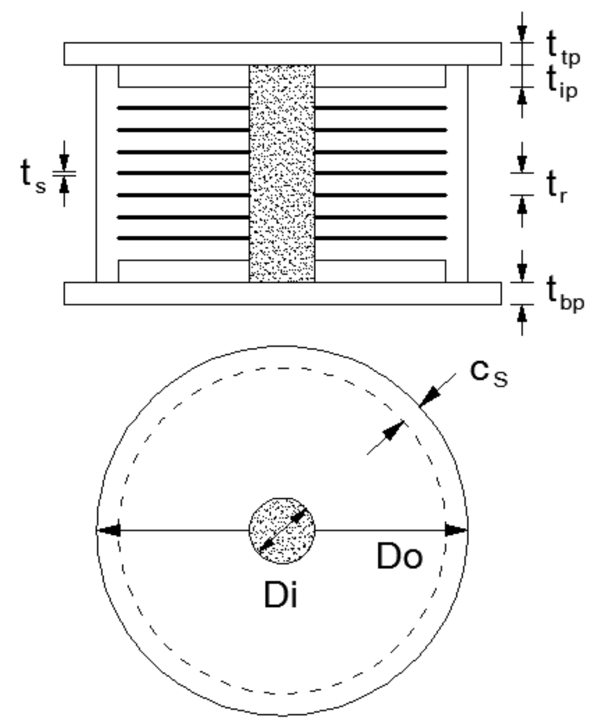


Figura 4 Dimensiones de un aislador con núcleo de plomo.
(Figura reproducida de Constantinou *et al. 2011)*

3. **Parámetros de la curva de histéresis**: se presentan en la figura 5. Para un aislador sin núcleo de plomo, el valor de Q_d es el siguiente.

$$Q_d = \frac{\pi\, \beta_{ef}\, k_d\, q^2}{\left(2 - \pi\, \beta_{ef}\right) q - 2q_y} \tag{2}$$

Donde β_{ef} es el amortiguamiento efectivo del sistema de aislación; k_d es la rigidez post fluencia; q_y es el desplazamiento de fluencia, que se considera igual a 2.5 cm; q es el desplazamiento máximo en el sistema de aislación. Norma de Aislación de Chile (2001)

Para un aislador con núcleo de plomo el valor de Q_d se halla con la siguiente expresión:

$$Q_d = A_L\, \tau_{py} \tag{3}$$

Donde A_L es el área de la sección transversal del núcleo de plomo y τ_{py} es el esfuerzo de corte del plomo a nivel de fluencia.

$$k_d = \frac{G\ A}{T_r} \qquad (4)$$

Donde G es el módulo de corte de la goma; A es el área de la sección transversal del aislador que trabaja al corte; T_r es la sumatoria de la altura de la goma del aislador. La fuerza de fluencia F_y cuando el aislador empieza a trabajar en el rango no lineal, vale.

$$F_y = Q_d + k_d\, q_y \qquad (5)$$

La rigidez elástica k_1 y la rigidez efectiva k_{EF} se hallan con las siguientes ecuaciones:

$$k_1 = \frac{F_y}{q_y} \qquad (6)$$

$$k_{EF} = k_d + \frac{Q_d}{q} \qquad (7)$$

Donde q es el desplazamiento lateral del sistema de aislación.

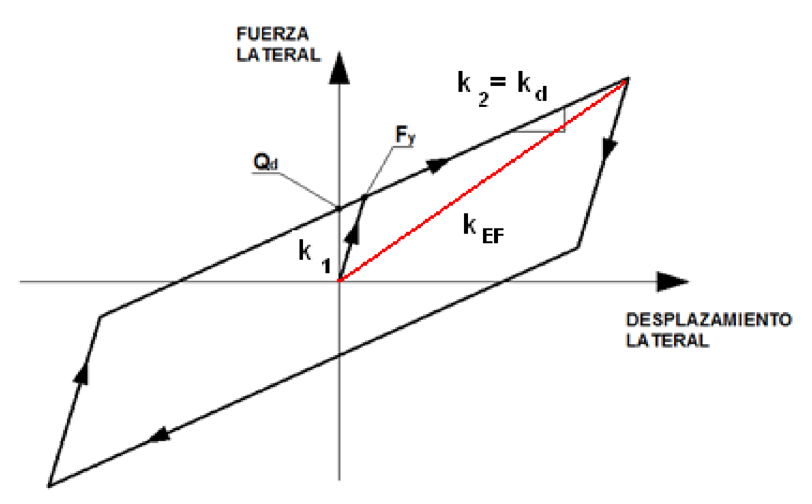


Figura 5 Parámetros que definen la curva de histéresis para un aislador elastomérico.

4. **Peso y Número de aisladores:** Se debe encontrar el peso total, W_t que llega al sistema de aislación el mismo que debe incluir el peso de la losa de aislación y peso de los aisladores. Por otra parte de sebe definir el número de aisladores N que se van a utilizar. Una opción es colocar un aislador en cada columna.

5.- **Propiedades del sistema total:** Se obtiene multiplicando los parámetros que definen la curva de histéresis por el número de aisladores N.

$$F_{ys} = F_y\, N$$
$$Q_{ds} = Q_d\, N$$
$$K_{ds} = K_d\, N \tag{8}$$
$$K_{1s} = K_1\, N$$

6.- **Desplazamiento Inicial:** Se impone un desplazamiento que se supone va a tener el sistema de aislación. q

7.- **Propiedades Dinámicas:** Se determina la rigidez efectiva mediante la ecuación (7) y se encuentra el período y factor de amortiguamiento, mediante las siguientes expresiones:

$$T_{EF} = 2\,\pi\,\sqrt{\frac{W_t}{g\,K_{EF}}} \tag{9}$$

$$\beta_{EF} = \frac{2\,Q_{ds}\,(q - q_y)}{\pi\,K_{EF}\,q^2} \tag{10}$$

Donde: W_t es el peso total que gravita en el sistema de aislación; g es la aceleración de la gravedad; K_{EF} es la rigidez efectiva; q es el desplazamiento lateral; q_y es el desplazamiento de fluencia; T_{EF} es el período efectivo; β_{EF} es el factor de amortiguamiento efectivo.

8.- **Espectro Reducido:** Este espectro se obtiene dividiendo el espectro de 5% de amortiguamiento para el valor de B.

$$B = \left(\frac{\beta_{EF}}{0.05}\right)^{0.3} \tag{11}$$

9.- **Cálculo del Desplazamiento:** Se ingresa con el período efectivo al espectro de desplazamiento y se obtiene el desplazamiento del sistema de aislación. Este desplazamiento debe ser parecido o igual al desplazamiento impuesto en el paso 6. Si no lo es se repite desde el paso 6. Si se trabaja con el espectro de aceleración, con el período efectivo se encuentra la aceleración espectral A_d y después mediante la definición del pseudo espectro se halla el desplazamiento.

$$q = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 A_d \tag{12}$$

3 ANÁLISIS SÍSMICO EN ESTRUCTURA CON AISLADORES

Posteriormente, como ejemplo práctico se realizará el análisis sísmico de la estructura de 3 pisos con aisladores sísmicos colocados sobre la cimentación. Por ahora, estamos centrando la atención en el marco teórico, del análisis sísmico, se entiende que en el apartado anterior ya se definió las determinó de los aisladores; ahora para el análisis se considera que los pisos son completamente rígidos por esta razón se consideran tres grados de libertad por planta, los mismos que se presentan en la figura 6.

Nótese como se numeran las coordenadas, primero los de la superestructura y finalmente los del sistema de aislación. Para la superestructura se empieza numerando en primer lugar los desplazamientos horizontales en dirección X, luego en dirección Y, finalmente las rotaciones de piso con respecto a un eje perpendicular al plano de la losa; en todos los casos la numeración se realiza de abajo hacia arriba. Aguiar (2004, 2012).

Los desplazamientos de la superestructura son relativos con respecto al movimiento del sistema de aislación. En estas condiciones la matriz de rigidez $\boldsymbol{K}$**,** es diagonal y la matriz de masas $\boldsymbol{M}$**,** no es diagonal. Aguiar *et al.* (2008).

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{K}^{(s)} & \\ & \boldsymbol{K}^{(b)} \end{bmatrix} \tag{13}$$

Donde $\boldsymbol{K}^{(s)}$ es la matriz de rigidez de la superestructura con base empotrada; para el ejemplo de la figura 7, esta matriz es de 9 por 9; $\boldsymbol{K}^{(b)}$ es la matriz de rigidez del sistema de aislación en coordenadas de piso, para el ejemplo es de 3 por 3. Aguiar (2004, 2012).

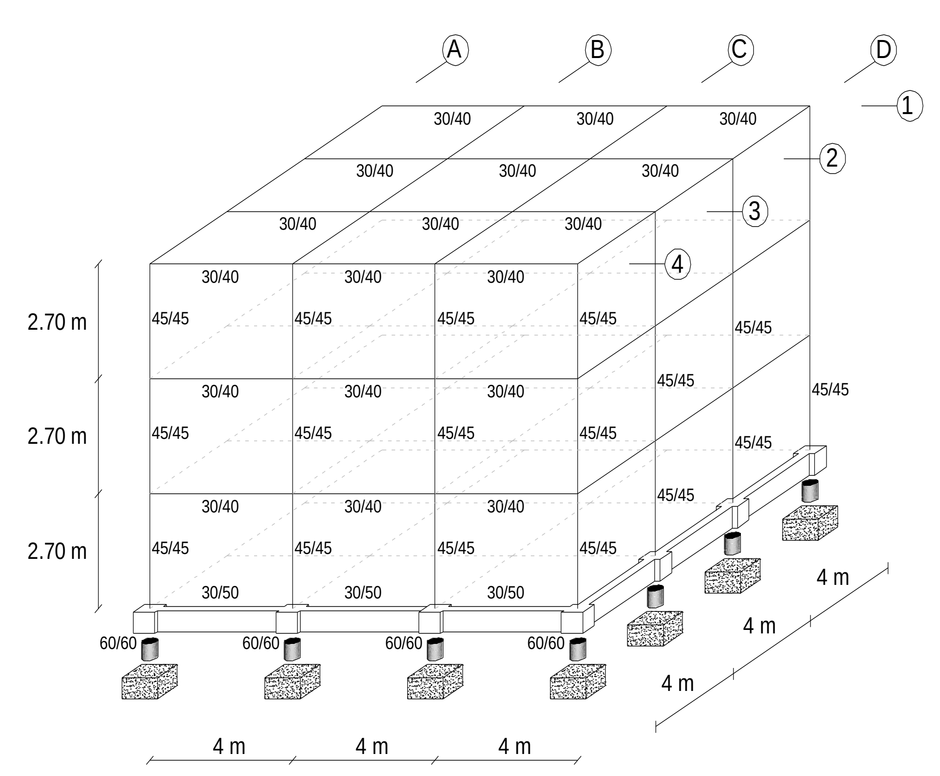


Figura 6 Estructura de tres pisos con aisladores sísmicos.

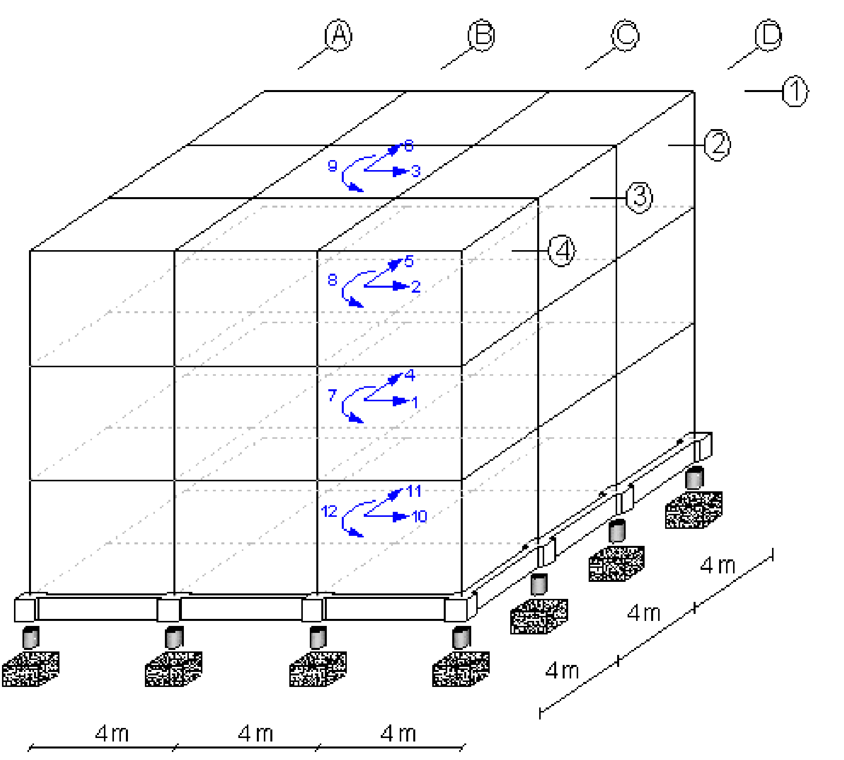


Figura 7 Sistema de coordenadas de piso para el análisis sísmico espacial.

En Aguiar (2013,2) se presenta la deducción de la matriz de masas para el modelo que se está presentando. La matriz de masas es:

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{m}^{(s)} & \boldsymbol{m}^{(s)}\boldsymbol{r}^{(s)} \\ \boldsymbol{r}^{(s)^t}\boldsymbol{m}^{(s)} & \boldsymbol{r}^{(s)^t}\boldsymbol{m}^{(s)}\boldsymbol{r}^{(s)} + \boldsymbol{m}^{(b)} \end{bmatrix} \tag{14}$$

Donde $\boldsymbol{m}^{(s)}$ es la matriz de masas de la superestructura, calculada con base empotrada; $\boldsymbol{m}^{(b)}$ es la matriz de masas del sistema de aislación; $\boldsymbol{r}^{(s)}$ es la matriz de incidencia de los grados de libertad de la superestructura.

$$\boldsymbol{m}^{(b)} = \begin{bmatrix} m_b & & \\ & m_b & \\ & & J_b \end{bmatrix} \tag{15}$$

Siendo m_b la masa solo del sistema de aislación; J_b es el momento de inercia de la masa m_b. Por otro lado, el vector de cargas $\boldsymbol{Q}$ se encuentra con la siguiente ecuación

$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{m}^{(s)}\boldsymbol{r}^{(s)} \\ \boldsymbol{r}^{(s)^t}\boldsymbol{m}^{(s)}\boldsymbol{r}^{(s)} + \boldsymbol{m}^{(b)} \end{bmatrix} \boldsymbol{r}^{(b)} \tag{16}$$

Donde $\boldsymbol{r}^{(b)}$ es la matriz de incidencia de los grados de libertad del sistema de aislación. Para el ejemplo de la figura 7, se tiene:

$$\boldsymbol{r}^{(s)^t} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{r}^{(b)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Se destaca que se ha presentado la matriz transpuesta de $\boldsymbol{r}^{(s)}$.

Una vez que se tiene la matriz de masa, la matriz de rigidez y el vector de cargas, se emplea el Método de Superposición Modal para encontrar los desplazamientos y giros máximos probables como para hallar las fuerzas y momentos en coordenadas de piso.

En la figura 8 se presenta el espectro elástico e inelástico, para un período de retorno de 475 años: En la parte superior se tiene el espectro elástico y en la inferior el inelástico reducido para un factor de reducción de las fuerzas sísmicas R para la zona de períodos en que trabaja la superestructura y reducido para un valor B para la zona de períodos en que trabaja el sistema de aislación.

En el Método de Superposición modal se utilizó el criterio de combinación modal de la normativa técnica de Perú (2003) que combina el 25 % del criterio del valor absoluto más el 75 % del criterio del valor máximo probable.

Con los desplazamientos elásticos se debe encontrar las derivas de piso de la superestructura y verificar que estas sean menores del 2.5 ‰. De acuerdo a la normativa de aislación de Chile de 2001. Por cierto de acuerdo a esta normativa el valor de R que recomiendan para la superestructura es de 2 y para la subestructura (pisos que se encuentran bajo la losa de aislación) es 1.5.

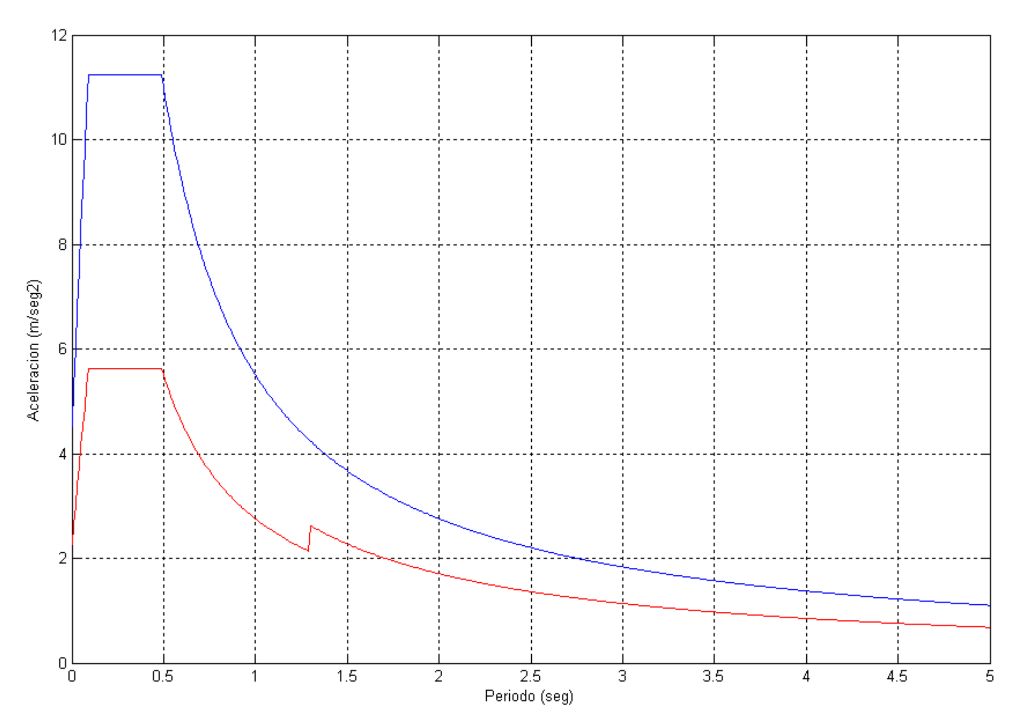


Figura 8 Espectro Elástico e Inelástico para estructura de ejemplo.

Para terminar el análisis sísmico, las fuerzas y momento en el Centro de Masas de cada piso, CM., se pasan a los pórticos. Aguiar (2004,2008).

4 ANÁLISIS ESTÁTICO EN PÓRTICOS CON AISLADORES

A partir de un análisis espacial, con las fuerzas y momentos en centro de masas, se puede encontrar las fuerzas, desplazamiento horizontal y rotación que gravita en cada aislador, para realizar el diseño del aislador propiamente dicho. Pero otra opción es encontrar esto a partir de un análisis plano en el cual el elemento aislador es modelado como un elemento vertical.

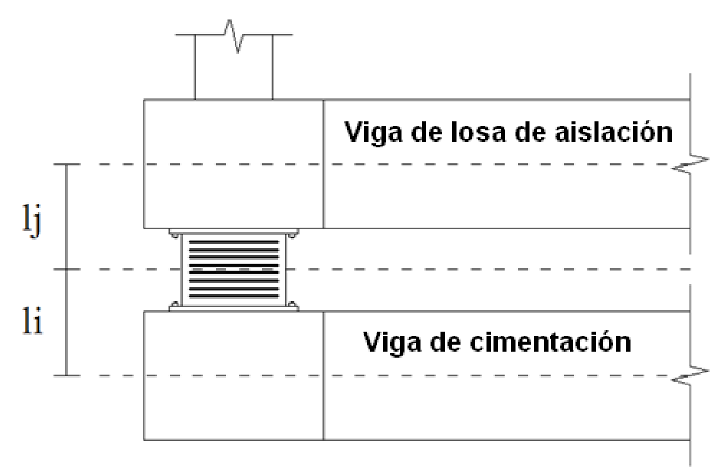


Figura 9 Distancias que definen el modelo del aislador.

En la figura 9 se presenta un aislador elastomérico o FPS de la primera generación el mismo que ha sido instalado sobre una viga de cimentación y bajo la viga de la losa de aislación. En esta figura se denomina l_i a la distancia desde el centro de gravedad del aislador hasta el punto medio de la viga de cimentación y l_j a la distancia desde el centro de gravedad hasta el punto medio de la viga de la losa de aislación. La longitud del elemento corto, con que se modela el aislador, es la suma de estas longitudes.

A la izquierda de la figura 10 se presenta el sistema de coordenadas locales del aislador cuya matriz de rigidez, $\boldsymbol{k}_0$ es la indicada en la ecuación (17) y a la derecha, de la figura 10, se muestra el sistema de coordenadas globales, $\boldsymbol{k}$ para este elemento que se obtiene en función de la matriz de paso de coordenadas locales a globales, $\boldsymbol{T}$. Almazán (2001)

$$\boldsymbol{k_0} = \begin{bmatrix} k_{EF} & 0 \\ 0 & k_v \end{bmatrix} \tag{17}$$

Donde k_{EF} es la rigidez efectiva horizontal; k_v es la rigidez vertical del aislador. La k_{EF} ya se indicó como se obtiene, restando indicar como se encuentra k_v.

$$k_v = \frac{A}{T_r}\left[\frac{1}{6\,G\,S^2} + \frac{4}{3k}\right]^{-1} \tag{18}$$

Donde A es el área transversal del aislador; T_r es la sumatoria de los espesores de las gomas t_r; S es la relación entre el área en planta de una goma con relación al área lateral de la goma (área de expansión); k que es el módulo volumétrico de la goma. Para un aislador circular elastomérico, con o sin núcleo de plomo, el factor de forma S se encuentra con la siguiente ecuación.

$$S = \frac{\frac{\pi}{4}\,(D_0^2 - D_i^2)}{\pi\,D_0\,t_r} \tag{19}$$

Donde D_0, D_i, son los diámetros exterior e interior del aislador; t_r es el espesor de una gorma. En la ecuación (19) no se simplificó π para que se vea la relación de las áreas.

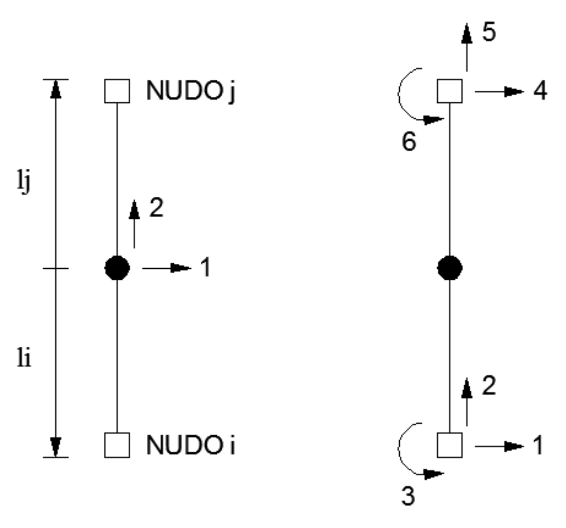


Figura 10 Coordenadas locales y globales de un elemento aislador.

La matriz de paso $\boldsymbol{T}$ se halla deducida en Aguiar (2013,1) y se encuentra en el micro sitio www.ia.espe.edu.ec, donde también están los programas del sistema de computación ***CEINCI-LAB*** con los cuales se realiza el análisis estático de un pórtico con aisladores elastoméricos modelados como un elemento corto.

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & l_i & 1 & 0 & l_j \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{20}$$

Finalmente, la matriz de rigidez del elemento aislador se halla con la siguiente ecuación.

$$\boldsymbol{k} = \boldsymbol{T}^t \ \boldsymbol{k_0} \ \boldsymbol{T} \tag{21}$$

5 DISEÑO DE AISLADOR CIRCULAR ELASTOMÉRICO

Los estados de carga que se consideran para el diseño de un aislador son los siguientes:

- **Carga Vertical**

$$1.2\,D + 1.6\,L \tag{22}$$

- **Carga Vertical más sismo DE**

$$1.2\,D + 0.5\,L + 1.0\,S_{DE}$$
$$1.2\,D + 0.25\,L + 1.0\,S_{MCE} \qquad (23)$$

Donde D es el estado de carga muerta; L es el estado de carga viva; S_{DE} es el estado da carga para el sismo de diseño; S_{MCE} es el estado de carga para el sismo máximo considerado. Los coeficientes de 0.5 y 0.25 son solo para el diseño del aislador. Constantinou *et al.* (2011). Para el diseño de las vigas y columnas de la superestructura estos coeficientes son la unidad.

5.1 Espesor de la goma

En la figura 11 se presenta una goma de espesor t_r que ha sufrido un desplazamiento horizontal u; un desplazamiento vertical v; y una rotación θ, por efecto de la carga axial P y del momento M. Interesa, en este apartado controlar que el espesor de la goma sea el adecuado, en base a las deformaciones angulares por: compresión γ_c, por rotación γ_r y por desplazamiento horizontal γ_s. Constantinou *et al.* (2011).

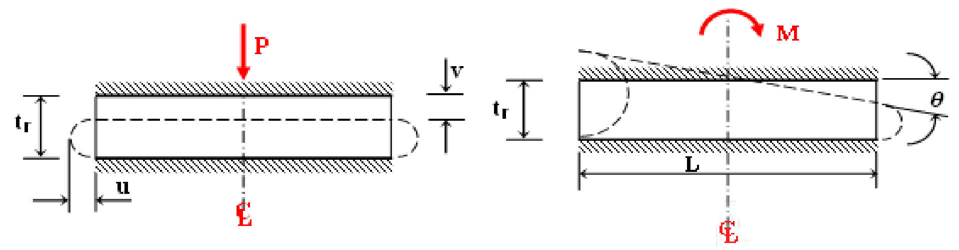


Figura 11 Cargas, desplazamientos y giro actuando en un aislador.

El área que trabaja al corte se ha denominado A; ahora cuando se deforma lateralmente como se indica en la figura 12, se tiene un área reducida a compresión que se denomina A_r., la misma que se calcula de la siguiente manera:

$$A_r = A\left(\frac{\delta - sen\,\delta}{\pi}\right) \qquad (24)$$

$$\delta = 2\,cos^{-1}\left(\frac{u}{D_0}\right) \qquad (25)$$

$$A = \frac{\pi}{4}\left(D_0^2 - D_i^2\right)$$

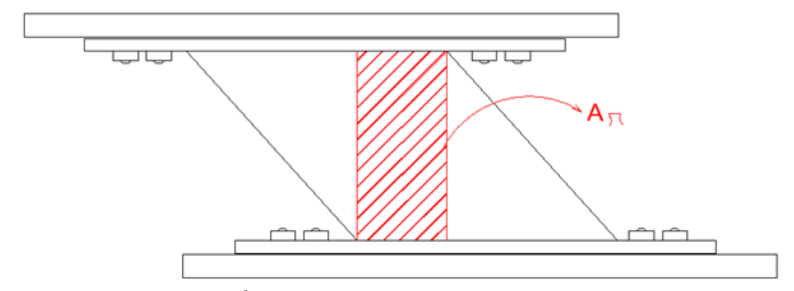


Figura 12 Área reducida en un aislador elastomérico

Para cuando actúa una carga axial P_u, la máxima deformación angular por compresión γ_c se halla con la siguiente expresión.

$$\gamma_c = \frac{P_u}{A_r\ G\ S} f_1 \quad \leq 3.5 \tag{26}$$

Se debe verificar que $\gamma_c \leq 3.5$ únicamente para el estado de cargas verticales, sin sismo. Con sismo γ_c puede ser mayor a 3.5 pero más adelante se indicará todos los controles que debe satisfacer. El factor f_1 se indica en la tabla 3, para un aislador circular, para encontrar el valor de f_1, se necesita conocer el factor de forma S, y la relación k/G, siendo k el módulo volumétrico de la goma y G el módulo de corte de la goma.

En Constantinou *et al.* (2011) existen dos tablas más para el factor f_1 que dependen de la ubicación del máximo esfuerzo a compresión, pudiendo darse dos casos, el primero que los máximos esfuerzos se encuentren ubicados en los extremos del círculo (Outer Surface) y la otra posibilidad que la resultante se halle en la parte exterior del círculo inferior (Inner Surface). Las normas AASHTO (2010) consideran $f_1 = 1.$ (Morales, 2013).

Tabla 3 Valores de f_1 para un aislador circular. Constantinou *et al.* (2011)

S	k/G			
	2000	**4000**	**6000**	∞
5.0	1.02	1.01	1.01	1.00
7.5	1.05	1.03	1.02	1.00
10.0	1.10	1.05	1.03	1.00
12.5	1.15	1.08	1.05	1.00
15.0	1.20	1.11	1.07	1.00
17.5	1.27	1.14	1.10	1.00
20.0	1.34	1.18	1.13	1.00
22.5	1.41	1.23	1.16	1.00
25.0	1.49	1.27	1.19	1.00
27.5	1.57	1.32	1.23	1.00
30.0	1.66	1.37	1.26	1.00

La deformación angular por rotación γ_r se halla con la siguiente expresión:

$$\gamma_r = \frac{D_0^2 \, \theta}{t_r \, T_r} \, f_2 \qquad (27)$$

Donde θ **es la rotación en el aislador para el estado de cargas verticales**, sin sismo; el valor de θ se debe incrementar en 0.005 para tener en cuenta fallas que pueden darse en el sistema constructivo; f_2 es el factor que afecta al corte, está indicado en la tabla 4, pero de igual manera en Constantinou *et al.* (2011) hay dos tablas adicionales para los casos Inner Suface y Outer Surface. Las normas AASHTO (2010) consideran $f_2 = 0.5$

Tabla 4 Valores de f_2 para un aislador circular. Constantinou *et al.* (2011)

S	k/G			
	2000	**4000**	**6000**	**∞**
5.0	0.37	0.37	0.37	0.37
7.5	0.36	0.36	0.37	0.37
10.0	0.34	0.36	0.36	0.37
12.5	0.33	0.35	0.36	0.37
15.0	0.32	0.34	0.35	0.37
17.5	0.30	0.33	0.34	0.37
20.0	0.28	0.32	0.33	0.37
22.5	0.27	0.31	0.32	0.37
25.0	0.25	0.29	0.32	0.37
27.5	0.24	0.28	0.31	0.37
30.0	0.23	0.27	0.30	0.37

La deformación angular por corte se encuentra con la siguiente ecuación:

$$\gamma_s = \frac{u}{T_r} \qquad (28)$$

Para que el espesor de la goma sea el adecuado, se debe verificar lo presentado en la tabla 5, para los estados de carga que ahí se indican, si para algún estado de carga no cumple se debe incrementar el espesor de la goma.

Tabla 5 Controles que debe cumplir el espesor de la goma

Estado de Carga	**Control**
$1.2\,D + 1.6\,L$	$\gamma_c + \gamma_r + \gamma_s < 6$
$1.2\,D + 0.5\,L + 1.0\,S_{DE}$	$\gamma_c + \frac{1}{2}\gamma_r + \gamma_s < 7$
$1.2\,D + 0.25\,L + 1.0\,S_{MCE}$	$\gamma_c + \frac{1}{4}\gamma_r + \gamma_s < 9$

5.2 Espesor de la placa shim

Un aislador elastomérico está conformado por una serie de gomas de espesor t_r, las mismas que estar vulcanizadas a unas placas de acero de espesor t_s a las que en este apartado se van a denominar *placas shim* para diferenciar de las placas principales del aislador que van en los extremos. El espesor de la placa t_s será capaz de soportar los esfuerzos máximos de tracción a corte τ_{max} que se generan en las placas debido a los esfuerzos radial σ_r, angular σ_θ y vertical σ_z, que se indican en la figura 13. Estos esfuerzos fueron calculados en forma elástica por Roeder *et al.* (1987) y son los siguientes:

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \frac{t_r}{t_s}\frac{P}{A_r}\left(\frac{3+\upsilon}{2}\right) \qquad (29)$$

$$\sigma_z = -2\,\frac{P}{A_r}$$

Donde t_r es el espesor de la goma; t_s es el espesor de la placa de acero shim, P es la carga axial, ν es el módulo de poisson del material, para el acero $\nu = 0.3$; A_r es el área reducida que trabaja a corte. El signo menos de σ_z significa que el esfuerzo es de compresión. Al reemplazar $\nu = 0.3$ en la ecuación (29) se halla:

$$\sigma_r = \sigma_\theta = 1.65\,\frac{t_r}{t_s}\frac{P}{A_r}$$

Por otra parte, el esfuerzo cortante máximo τ_{max} es:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_r - \sigma_z}{2}$$

Al reemplazar σ_r y σ_z se tiene:

$$\tau_{max} = \frac{1.65\,\frac{t_r}{t_s}\frac{P}{A_r} + 2\,\frac{P}{A_r}}{2} = \frac{P}{2\,A_r}\left(2 + 1.65\,\frac{t_r}{t_s}\right)$$

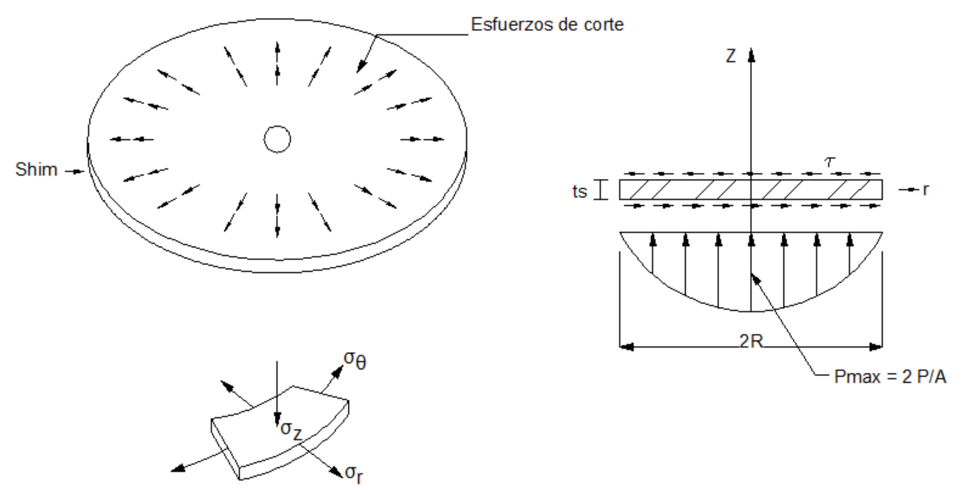


Figura 13 Esfuerzos que gravitan en la placa de acero intermedia del aislador. (Figura reproducida de Constantinou *et al.* 2011)

Ahora bien, el esfuerzo máximo del acero a tracción es $0.6\, f_y$. Donde f_y es el esfuerzo de fluencia del acero; si a este esfuerzo consideramos un factor de minoración de esfuerzos de 0.9. Se tiene que el esfuerzo máximo del acero es:

$$\tau_{max} = 0.54\, f_y$$

Con lo que se tiene:

$$0.54\, f_y = \frac{P}{2\, A_r}\left(2 + 1.65\, \frac{t_r}{t_s}\right)$$

Al despejar el valor de t_s de esta última ecuación se tiene:

$$t_s = \frac{1.65\, t_r}{1.08\, f_y\, \frac{A_r}{P} - 2}$$

Lógicamente que para que el diseño tenga un factor de seguridad, el espesor de las placas de acero debe ser mayor al indicado en la última ecuación. Se denomina α al valor de 1.65, que es para placas de acero sin orificio, con lo que se tiene.

$$t_s > \frac{\alpha\, t_r}{1.08\, f_y\, \frac{A_r}{P} - 2} \quad (30)$$

Las normas AASHTO (2010) recomiendan que el valor de $\alpha = 3$ para placas de acero con orificios. De tal manera que $\alpha = 1.65$ se utilizará para placas sin orificios. **Finalmente el espesor de la placa $t_s > 1.9\ mm$.**

Únicamente para el sismo MCE, el esfuerzo de fluencia del acero se incrementa en 30%. Constantinou *et al.* (2011).

5.3 Control del Pandeo del aislador

El problema de pandeo fue estudiado por Kelly (1993) quien determinó la siguiente expresión para encontrar la carga crítica de pandeo en una posición no desplazada del aislador, P_{cr}.

$$P_{cr} = \frac{\pi \sqrt{\lambda}\, G\, S\, A\, r}{T_r} \tag{31}$$

Donde $\lambda = 2$, para aisladores circulares y $\lambda = 2.25$ para aisladores rectangulares; G es el módulo de corte de la goma; S es el factor de forma de la goma; A es el área del aislador que trabaja al corte; r es el radio de giro; T_r es la sumatoria de los anchos de las gomas. Se recuerda que el radio de giro se obtiene con la siguiente ecuación.

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Donde I es el momento de inercia; A es el área. Para un aislador circular sin orificio $r = \frac{D}{4}$; el factor de forma $S = \frac{D}{4\, t_r}$ y el área que trabaja al corte es $A = \frac{\pi\, D^2}{4}$. Donde D es el diámetro del aislador sin orificio; t_r es el ancho de una goma. Al remplazar $\lambda = 2$ y las ecuaciones que definen r, S, A, se obtiene:

$$P_{cr} = 0.2181\, \frac{G\, D^4}{t_r\, T_r} \tag{32}$$

Ahora bien, para un aislador circular con o sin núcleo de plomo pero que tenga un orificio en la mitad, la carga crítica de pandeo sin tener desplazamiento horizontal se obtiene con la siguiente ecuación. Constantinou *et al.* (2011).

$$P_{cr} = 0.2181\, \frac{G\;\, D_0^4}{t_r\, T_r}\, \frac{\left(1 - \frac{D_i}{D_0}\right)\left(1 - \frac{D_i^2}{D_0^2}\right)}{1 + \frac{D_i^2}{D_0^2}} \tag{33}$$

La carga crítica de pandeo cuando el aislador tiene un desplazamiento lateral, P'_{cr}, se halla con la siguiente ecuación.

$$P'_{cr} = P_{cr}\, \frac{A_r}{A} \tag{34}$$

Para restringir el desplazamiento lateral se debe verificar que cumpla:

$$P'_{cr} > 0.15\, P_{cr} \tag{35}$$

Si no cumple la ecuación (35) se debe rediseñar el aislador.

Los controles (factores de seguridad) adicionales a verificar son los siguientes:

- **Para Cargas Verticales**

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} > 2 \tag{36}$$

- **Para Cargas Verticales más sismo MCE**

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} > 1.1 \tag{37}$$

5.4 Placas exteriores del aislador

Se aplica el Método del Área Reducida para determinar el espesor de las placas exteriores del aislador, cuyos espesores se indicaron en la figura 4 y tienen la siguiente nomenclatura: t_{tp}, t_{bp}, espesores de la placa superior e inferior; t_{ip} espesor de la placa que está inmersa en el aislador en caso de requerirse.

El método determina una columna rectangular equivalente de dimensiones $0.75\ L * b$, para el aislador. Donde:

$$L = D_0 - 2\ c_s \tag{38}$$

$$b = \frac{A_r}{L} \tag{39}$$

Donde c_s es el recubrimiento de la goma; L es la longitud de la placa cuadrada del aislador; A_r es el área reducida del aislador que se obtiene en función del desplazamiento lateral pero ahora se debe tener en cuenta que el núcleo de plomo también actúa para soportar la carga axial, de tal manera que el área del aislador A se encuentra con:

$$A = \frac{\pi}{4} D_0^2$$

Con esta acotación se recuerda el cálculo del área reducida.

$$\delta = 2\ cos^{-1}\left(\frac{u}{D_0}\right)$$

$$A_r = A\left(\frac{\delta - sen\ \delta}{\pi}\right)$$

- Para el sismo ***DE*** el desplazamiento lateral u es igual al desplazamiento lateral debido al sismo ***DE*** más el 50% del desplazamiento lateral obtenido ante cargas verticales.

- Para el sismo ***MCE*** el desplazamiento lateral u es igual al desplazamiento lateral del sismo ***MCE*** más el 25% del desplazamiento lateral encontrado ante cargas verticales.

En la figura 14 se presenta el Método del Área Reducida, que está basado en el diseño de una columna con dos placas en los extremos desarrollado por DeWolf y Ricker (1990). En esta figura al espesor de la placa se ha denominado t pero que es igual a $t_{bp} + t_{ip}$ si se trata de la placa inferior o $t_{tp} + t_{ip}$ si se trata de la placa superior.

El modelo considera que el esfuerzo del hormigón (que aparece en la parte inferior de la figura 14) denominado f_b es igual a:

$$f_b = 1.7\, \emptyset_c\, f_c' \quad (40)$$

Donde f_c' es la resistencia del hormigón a compresión de los elementos estructurales (Losa de aislación); el valor de 1.7 corresponde al incremento de resistencia del hormigón por el confinamiento que este tiene; $\emptyset_c$ es el factor de minoración de esfuerzos, para el sismo ***DE*** el valor de $\emptyset_c = 0.65$ y para el sismo ***MCE*** este factor vale 1.

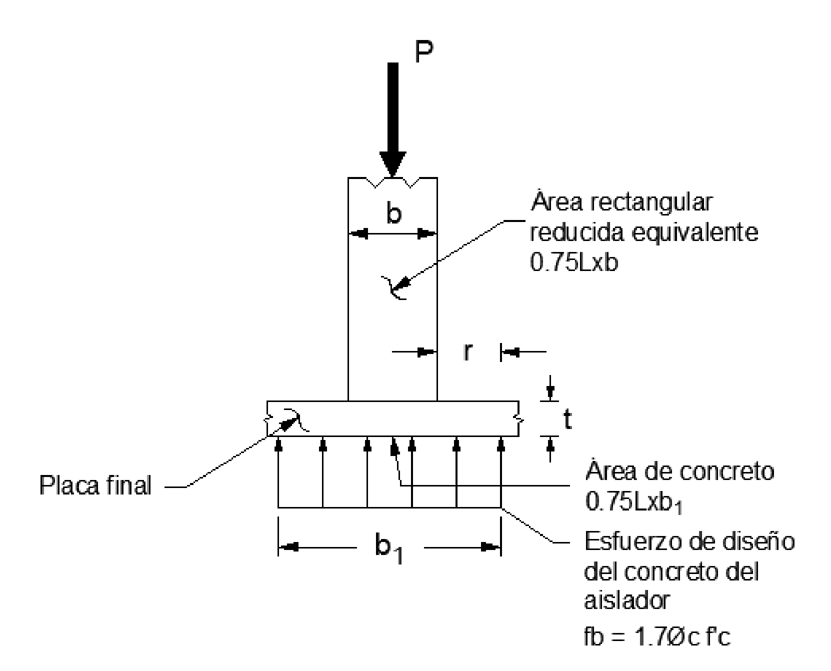


Figura 14 Método del área reducida para determinar el espesor de placas externas. (Figura reproducida de Constantinou *et al.* 2011)

El esfuerzo del hormigón f_b, producto de la carga axial P actúa en una superficie de dimensiones $0.75\, L * b_1$ de tal manera que:

$$b_1 = \frac{P}{0.75\, L\, f_b} \quad (41)$$

En la figura 14 se aprecia que la longitud del voladizo r sobre la que gravita el esfuerzo $f_b$es igual a:

$$r = \frac{b_1 - b}{2} \tag{42}$$

El momento al inicio del voladizo, por unidad de longitud, es:

$$M_u = \frac{f_b \, r^2}{2} \tag{43}$$

El espesor de las placas de acero requerido se encuentra con la siguiente expresión.

$$t \geq \sqrt{\frac{4 \, M_u}{\emptyset_b \, f_y}} \tag{44}$$

Donde f_y es el esfuerzo de fluencia de las placas de acero; $\emptyset_b$ es el factor de minoración de esfuerzos. Para el sismo ***DE***, el valor de $\emptyset_b = 0.9$ y para el sismo ***MCE***, $\emptyset_b = 1$.

6 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y SISMOS DE ANÁLISIS

La estructura presentada en la figura 6, se le diseña con aisladores sísmicos, de dos dimensiones. El primero de ellos tiene la altura total más alta que el diámetro exterior, de tal manera que se trata de un aislador esbelto y el segundo es lo contrario es decir la altura total es menor que el diámetro del aislador. En la tabla 6 se indica la geometría de estos aisladores que se han identificado con los números 1 y 2, respectivamente.

Tabla 6 Propiedades geométricas de los aisladores con núcleo de plomo.

Propiedades Geométricas	**Aislador 1**	**Aislador 2**
$D_0\ (cm)$	40.00	35.50
$D_i(cm)$	7.00	9.00
$H_t(cm)$	46.80	21.60
$T_r\ (cm)$	30.00	12.00
$t_r(mm)$	5.00	5.00
$t_s(mm)$	2.00	2.00
$t_{tp} = t_{bp}(cm)$	2.5	2.50
# capas de goma	60	24
# capas de placas shim	59	23
# número de aisladores	16	16

Las propiedades de los materiales de cada uno de los aisladores se presentan en la tabla 7, ya que el análisis se va a realizar para los dos límites de materiales, denominados LB y UB.

Tabla 7 Características de los Materiales

Nombre	Límite Inferior *LB*	Límite Superior *UB*	Unidades
Módulo de Corte efectivo de Goma, G	5.95	8.05	Kg/cm^2
Módulo Volumétrico de Goma, k	2000	2000	MPa.
Módulo de Corte del Plomo, G_p	127.5	172.5	MPa.
Esfuerzo de corte del Plomo τ_{py}	85	115.0	Kg/cm^2

El espectro de diseño elástico, ***DE***, es el indicado en la figura 8, que corresponde a una estructura situada en la ciudad de Quito, en una zona donde los factores de sitio, obtenidos del estudio de microzonificación sísmica realizada por ERN-2012, son los siguientes: $F_a = 1.155$; $F_d = 0.575$; $F_s = 1.790$. Las ecuaciones con las que se obtiene este espectro son las indicadas en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-11.

$$S_a(g) = z\,F_a\left(1 + (\eta - 1)\frac{T}{T_o}\right) \qquad T < T_o \qquad (45)$$

$$S_a(g) = \eta\,z\,F_a \qquad T_0 < T < T_C$$

$$S_a(g) = \eta\,z\,F_a\left(\frac{T_c}{T}\right)^r \qquad T > T_C \qquad (46)$$

Donde $S_a(g)$ es la aceleración del suelo como una fracción de la gravedad; z es el factor de zona sísmica, para Quito es igual a 0.4; F_a es el factor de sitio de aceleraciones; F_d es el factor de sitio de desplazamientos; F_S es el factor que toma en cuenta el comportamiento no lineal del suelo. Los períodos $T_0, T_C,$ que definen las ramas del espectro se hallan con las siguientes ecuaciones:

$$T_0 = 0.1\ F_S\,\frac{F_d}{F_a} \qquad (48)$$

$$T_C = 0.55\,F_S\,\frac{F_d}{F_a}$$

Para Quito, el valor de $\eta = 2.48$; el valor de $r = 1$ cuando se trabaja con los factores de sitio de la microzonificación sísmica. Para la superestructura se va a considerar un valor de reducción de las fuerzas sísmicas $R = 2$.

El espectro del sismo ***MCE***, que tiene un período de retorno de 2475 años se obtuvo multiplicando el espectro del sismo ***DE*** por 1.5

En la figura 15 se presenta el estado de cargas verticales 1.2 D + 1.6 L, para uno de los pórticos (todos son iguales) . Los pisos de la superestructura tienen la misma carga y es $D = 0.9538\, T/m^2$; $L = 0.2\, T/m^2$, para la carga de la figura 14 se consideró un ancho cooperante de 4 m. Castillo y Pazmiño (2013).

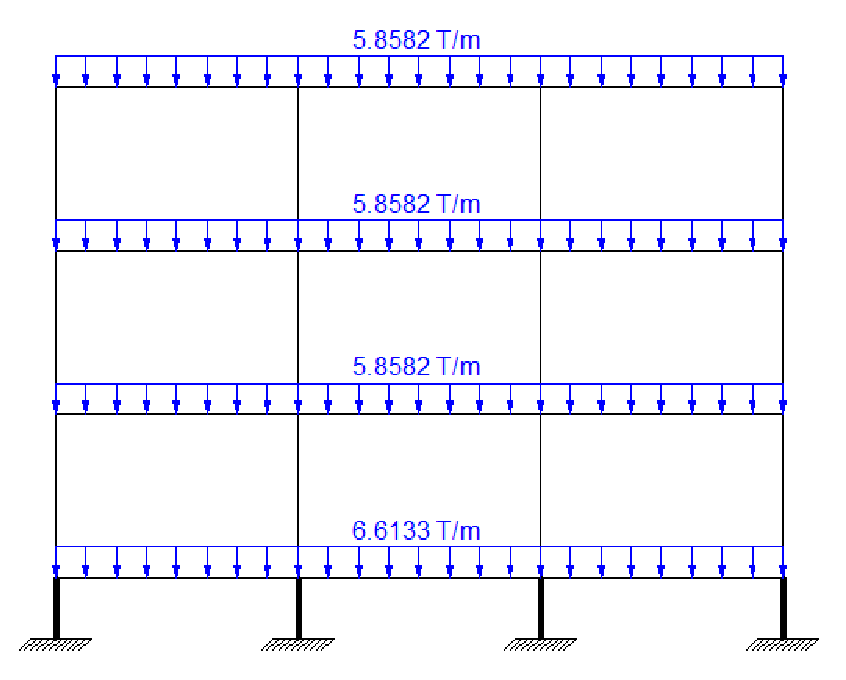


Figura 15 Combinación 1.2 D + 1.6 L

7 RESULTADOS

En la tabla 8 se presenta el desplazamiento lateral máximo del aislador q; las rigideces tangente y secante, k_d, k_{EF}; el período de vibración T, donde se aprecia que la estructura con el aislador 2 es más rígida. Se presenta también la deriva de piso máxima elástica en la superestructura, que de acuerdo a la normativa de aislación sísmica de Chile de 2001 tiene que ser menor a 2.5 ‰.

Tabla 8 Desplazamiento aislador, rigidez, período y deriva de piso máxima en superestructura

Parámetro	Unidad	**Aislador 1**					
		Cargas Verticales		**Sismo DE**		**Sismo MCE**	
		LB	**UB**	**LB**	**UB**	**LB**	**UB**
q Aislador	cm	0.00	0.00	15.57	12.34	28.67	22.71
k_d	T/m			24.16	32.69	24.16	32.69
k_{EF}	T/m			44.82	67.67	35.49	51.97
T	S			1.83	1.49	2.05	1.70
γ Elástico	‰	0.00	0.00	1.19	1.44	1.72	2.02

Parámetro	Unidad	**Aislador 2**					
		Cargas Verticales		**Sismo DE**		**Sismo MCE**	
		LB	**UB**	**LB**	**UB**	**LB**	**UB**
q Aislador	cm	0	0	10.73	8.67	19.47	15.54
k_d	T/m			45.92	62.13	45.92	62.13
k_{EF}	T/m			96.32	146.5	73.69	109.2
T	S			1.25	1.01	1.42	1.17
γ Elástico	‰	0	0	1.74	2.14	2.41	**2.87**

Con el aislador 1, el período de vibración varía entre 1.49 y 2.05 seg. Con el aislador 2, estos períodos se encuentran entre 1.01 y 1.42 seg. El período de vibración de la estructura sin aisladores es 0.36 seg., de tal manera que tener períodos entre 1.01 y 142 seg., con aisladores son adecuados.

En la tabla 9 se presenta el control del espesor de la goma, t_r para un **aislador interior** que tiene más carga.

Tabla 9 Control de las deformaciones angulares

Deformación Angular	Aislador 1					
	Cargas Verticales		Sismo DE		Sismo MCE	
	LB	UB	LB	UB	LB	UB
$\gamma_c \leq 3.5$	0.72	0.56				
$\gamma_c + \gamma_s + \gamma_r \leq 6$	0.91	0.75				
$\gamma_c + \gamma_s + 0.5\gamma_r \leq 7$			1.81	1.30		
$\gamma_c + \gamma_s + 0.25\gamma_r \leq 9$					4.44	2.28

Deformación Angular	Aislador 2					
	Cargas Verticales		Sismo DE		Sismo MCE	
	LB	UB	LB	UB	LB	UB
$\gamma_c \leq 3.5$	1.22	0.94				
$\gamma_c + \gamma_s + \gamma_r \leq 6$	1.56	1.27				
$\gamma_c + \gamma_s + 0.5\gamma_r \leq 7$			2.70	2.01		
$\gamma_c + \gamma_s + 0.25\gamma_r \leq 9$					4.56	2.99

La primera fila de la tabla 10 corresponde al espesor de la placa shim que se obtiene con la ecuación (30); la segunda fila es lo que se requiere de espesor mínimo y la tercera fila la cantidad que se adopta como espesor de la placa shim.

Tabla 10 Cálculo de espesor de placas interiores shim

Espesor de placa shim	Aislador 1					
	Cargas Verticales		Sismo DE		Sismo MCE	
	LB	UB	LB	UB	LB	UB
t_s (mm) Calculado	0.36	0.36	0.63	0.53	1.61	0.79
t_s (mm) requerido	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90
t_s (mm) adoptado	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00

Espesor de placa shim	Aislador 2					
	Cargas Verticales		Sismo DE		Sismo MCE	
	LB	UB	LB	UB	LB	UB
t_s (mm) Calculado	0.62	0.62	0.87	0.77	1.21	0.86
t_s (mm) requerido	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90
t_s (mm) adoptado	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00

El cálculo del espesor de las placas exteriores se lo realiza mediante el método del área reducida, razón por la cual en la tabla 11 se presenta en la primera fila el área reducida A_r, en la segunda fila el área requerida A_{req}. Si el área requerida es menor que el área reducida el espesor de la placa exterior es el mínimo (25 mm).

En la tabla 12 se presenta el control del pandeo en el aislador; en la primera fila se indica la carga crítica de pandeo sin considerar desplazamiento lateral, P_{cr}; en la segunda la carga crítica de pandeo considerando desplazamiento lateral P'_{cr}; en la tercera el control que se debe realizar para el estado de cargas verticales y en la cuarta el control para el estado de cargas con el sismo MCE.

Tabla 11 Área reducida; requerida y espesor de placas exteriores.

Espesor de placa exterior	**Aislador 1**					
	Cargas Verticales		**Sismo DE**		**Sismo MCE**	
	LB	**UB**	**LB**	**UB**	**LB**	**UB**
A_r (cm^2)	1218	1218	630	747	211	387
A_{req} (cm^2)			353	355	221	222
t_{tp} (mm)	25	25	25	25	25	25

Espesor de placa exterior	**Aislador 2**					
	Cargas Verticales		**Sismo DE**		**Sismo MCE**	
	LB	**UB**	**LB**	**UB**	**LB**	**UB**
A_r (cm^2)	926	926	587	656	327	443
A_{req} (cm^2)			357	360	224	226
t_{tp} (mm)	25	25	25	25	25	25

Tabla 12 Control del Pandeo

Control De pandeo	**Aislador 1**					
	Cargas Verticales		**Sismo DE**		**Sismo MCE**	
	LB	**UB**	**LB**	**UB**	**LB**	**UB**
P_{cr} (T)	214	290			214	290
$P'_{cr} > 0.15\ P_{cr}$ (T)	214	290			37.2	92.4
$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 2$	2.26	3.04				
$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 1.1$					**0.47**	1.16

Control De pandeo	**Aislador 2**					
	Cargas Verticales		**Sismo DE**		**Sismo MCE**	
	LB	**UB**	**LB**	**UB**	**LB**	**UB**
P_{cr} (T)	225	305			225	305
$P'_{cr} > 0.15\ P_{cr}$ (T)	225	305			79.5	145.8
$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 2$	2.35	3.17				
$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 1.1$					**0.99**	1.80

En las tablas presentadas, con negrilla se indica lo que no cumple; en el aislador 2 no cumple ligeramente el control del pandeo para el sismo MCE, para el material **LB** que debe ser mayor a 1.1 y la relación entre la carga crítica de pandeo considerando desplazamiento lateral con respecto a la carga axial es 0.99, ligeramente menor; tampoco cumple que la deriva de piso máxima elástica debe ser menor a 2.5 por mil; se tiene 2.87 para el sismo MCE.

Con el aislador 1 el control del pandeo para el sismo MCE es crítico se tiene 0.47 cantidad que es menos de la mitad de lo que se requiere de 1.1. Por lo que tiene que redimensionarse.

8 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

El principal objetivo de este artículo era socializar el conocimiento del diseño de estructuras con aisladores sísmicos elastoméricos con núcleo de plomo, para que así se incremente el número de construcciones con estos dispositivos de control en zonas de alta peligrosidad sísmica. Por este motivo es que se presentó con detalle el diseño de los aisladores, de acuerdo al desarrollo científico al 2013, en esta temática en la Universidad de Buffalo. Se aspira haber logrado este objetivo.

AGRADECIMIENTOS

Al Profesor Michel Constantinou, de la Universidad de Buffalo; a los futuros Ph.D., de la mencionada universidad, Enrique Morales y Jorge Cueto, por aceptar la invitación de formar parte de los catedráticos del XIX Curso Internacional de Estructuras que se realizó en la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, en Junio de 2013 y enseñar en forma magistral los desarrollos científicos logrados en el campo de la Aislación Sísmica en la Universidad de Buffalo.

De igual manera se agradece al Profesor Miguel Tornello, de la Universidad Tecnológica Nacional, de Mendoza, por compartir con nosotros, en el marco del XIX Curso Internacional de Estructuras, las investigaciones que están realizando en aislación sísmica reemplazando las placas interiores de acero del aislador elastomérico por placas de FRP y materiales similares, en un futuro artículo se tratará sobre esta temática.

REFERENCIAS

1. AASHTO (2010) *LRFD Bridge Design Specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials.

2. Aguiar R., (2013,1), "Análisis estático de una estructura con aisladores sísmicos utilizando *CEINCI-LAB"* Terceras Jornadas de Investigación Científica desde las Aulas. Micrositio: www.ia.espe.edu.ec.

3. Aguiar R., (2013,2), *Microzonificación sísmica de Quito,* Centro de Investigaciones Científicas. Universidad de Fuerzas Armadas. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, IPGH, Primera edición, 214 p., Quito.

4. Aguiar R., Pazmiño M., Castillo J., (2013), "Comparación entre el método de la rigidez secante y tangente en el análisis sísmico de estructuras con aisladores elastoméricos con núcleo de plomo utilizando factores de sitio NEC-11 y ERN-12", *Tercera Jornada de Investigación Científica desde las aulas. Carrera de Ingeniería Civil. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE,* 14 p., Quito.

5. Aguiar (2012) *Dinámica de Estructuras con CEINCI-LAB.* Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 416 p., Quito.

6. Aguiar R., (2010), "Peligrosidad sísmica del Ecuador y descripción de los puentes construidos sobre el estuario del río Esmeraldas, con aisladores de base FPS", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, **15 (1),** 85-118, Quito.
7. Aguiar R. (2004) *Análisis Matricial de Estructuras,* Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército. Tercera Edición, 550 p., Quito.

8. Almazán J. L., (2001), *Torsión accidental y natural de estructuras aisladas con el sistema de Péndulo friccional.* Tesis para obtener título de Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Católica de Chile, 288 p., Santiago de Chile.

9. Castillo J.G., Pazmiño M.B., (2013), *Diseño sísmico de estructuras con aisladores de acuerdo al ASCE 7-10 y análisis de torsión,* Tesis de grado. Carrera de Ingeniería Civil. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, Quito.

10. Constantinou M., (2013) *Curso de Aislación Sísmica.* XIX Curso Internacional de Estructuras. Universidad de Fuerzas Armadas EPE, Quito Ecuador.

11. Constantinou M., Kalpakidis I., Filiatrault A., and Ecker Lay R., (2011), *LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators,* Technical Report MCEER-11-0004, 436 p.

12. Cueto J., (2013), *Curso de Aislación Sísmica.* XIX Curso Internacional de Estructuras. Universidad de Fuerzas Armadas EPE, Quito Ecuador.

13. DeWolf J. T. and Ricker D.T., (1990), *Column base plates.* Steel Design Guide Series 1. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois.

14. ERN-2012, *Microzonificación sísmica del distrito metropolitano de Quito: Estudio de la amenaza sísmica a nivel local.* Programa para la reducción de riesgos urbanos. Distrito Metropolitano de Quito.

15. Kelly J., (1993), *Earthquake-Resistant Design with Rubber,* Department of Civil Engineering, University of California, 134 p., Berkeley California.

16. Morales E., (2013), *Curso de Aislación Sísmica.* XIX Curso Internacional de Estructuras. Universidad de Fuerzas Armadas EPE, Quito Ecuador.

17. NEC-11 (2011) *Norma Ecuatoriana de la Construcción,* Cámara de la Construcción de Quito.

18. Norma de Aislación de Chile (2001), *Proposición de código para el análisis y diseño de edificios con aislación sísmica,* Achisina. Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Sísmica, 70 p., Santiago de Chile.

19. Norma E.030 (2003), *Reglamento Nacional de Construcciones.* Norma Técnica de Edificaciones. Diseño Sismo Resistente, Servicio Nacional de Normalización, Capacitación e Investigación para la Industria de la Construcción, SENSICO, 36 p. Lima.

20. Roeder C.W., Stanton J.F., and Taylor A.W., (1987), *Performance of Elastomeric Bearings"* Report N. 298, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington D.C.

21. Romo M., (2013) *Curso de Aislación Sísmica,* XIX Curso Internacional de Estructuras. Universidad de Fuerzas Armadas, ESPE.